

ЗАСТОСУВАННЯ КРУГОВИХ СТАТИСТИК ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Ю. В. КУЦ¹, Ю. Ю. ЛИСЕНКО¹, М. О. РЕДЬКА¹, О. Д. БЛИЗНЮК²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: j.lysenko@kpi.ua

²Національний авіаційний університет. 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Розглянуто метод виявлення сигналів ультразвукового неруйнівного контролю на фоні адитивного гауссового шуму. Метод ґрунтується на аналізі кругової дисперсії, яка визначається за фазовою характеристикою досліджуваного сигналу, і не потребує апріорної інформації про параметри моделі сигналу ультразвукового неруйнівного контролю. Наведено результати моделювання процесу виявлення сигналів ультразвукового неруйнівного контролю на фоні шуму. Бібліо-гр. 11, рис. 4.

Ключові слова: кругові статистики, кругова дисперсія, виявлення сигналів в шумах, ультразвуковий неруйнівний контроль

Теорія, методи і засоби виявлення сигналів на початку розвитку розроблювались і використовувались для завдань радіолокації [1]. У подальшому ці методи поширились і на інші предметні області – зв'язок, телекомунікацію, технічну та медичну діагностику тощо. Такі методи знаходять застосування і в ультразвуковому неруйнівному контролі (УНК) для виявлення сигналів на фоні шуму [2, 3].

В більшості практичних завдань сигнал, який надходить для аналізу, уявляє адитивну суміш корисної складової, що несе інформацію про об'єкт контролю (ОК) і шумової, що утворюється власними шумами апаратури та шумами середовища. Модель корисної складової розглядається як радіоімпульсний сигнал з відомими обвідною та частотою сигналу-носія. Завдання виявлення полягає у формуванні відповіді на питання: чи містить (з певною ймовірністю) аналізована вибірка корисну складову. У разі позитивної відповіді необхідно оцінити часове положення радіоімпульсу.

Для виділення сигналу на фоні значного шуму використовуються різні методи: оптимальної фільтрації сигналів [3]; узгодженої фільтрації сигналів [4]; застосування сигналів з різними видами модуляції і маніпуляції [5, 6]; кореляційного прийому сигналів [3, 4]; спліт метод [7]; метод вейвлет-аналізу [8]. Всі ці методи потребують знання копії корисної складової сигналу.

Завдання виявлення сигналів УНК мають певну специфіку. По-перше, з метою зменшення мертвої зони і підвищення поздовжньої роздільної здатності корисна складова сигналу УНК повинна бути якомога більш локалізованою в часі. По-друге, реальний сигнал суттєво відрізняється від його моделі, що викликано ефектом Допплера, спо-

творенням сигналу в електроакустичному тракті його передавання, нестабільністю характеристик сигналу за використання генерації сигналу способом ударного збудження тощо. По-третє, нові конструкційні матеріали зазвичай мають підвищені коефіцієнти загасання ультразвукових коливань, що потребує аналізу сигналів за зменшеного відношення сигнал/шум. Ці фактори обумовлюють необхідність удосконалення методів виявлення сигналів для УНК.

В роботах [9, 10] розглянуто метод виявлення сигналів УНК за аналізом кругової дисперсії різниці фазових характеристик корисної складової сигналів та гармонічного сигналу з частотою сигналу-носія. Останній, хоча й не потребує знання повної копії сигналу, але передбачає необхідність апріорної інформації про частоту сигналу-носія. Саме такі специфічні умови часто мають місце в практиці УНК.

Метою роботи є розроблення методу виявлення сигналів УНК на фоні адитивного гауссового шуму, що ґрунтується на аналізі кругової дисперсії, яка визначається за фазовою характеристикою досліджуваного сигналу і за відсутності апріорної інформації про параметри моделі сигналу УНК.

Постановка завдання. Аналізований сигнал на часі спостереження $t \in [0, T_c]$ уявляє адитивну суміш корисного сигналу у вигляді періодичної з періодом T_{Π} послідовності радіоімпульсів і гауссового шуму $\xi(t)$ з дисперсією σ^2 і нульовим математичним сподіванням

$$u_c(t) = U(t) \sin(2\pi f(t - \tau_3)) + \xi(t), \quad t \in [0, T_c], \quad (1)$$

де $U(t)$ – обвідна сигналу; f – невідома частота сигналу-носія, $T_c \gg f^{-1}$; τ_3 – затримка радіоімпульсів відносно початку спостереження.

Сигнал (1) представлений вибіркою $\{u[j], j = \overline{1, N}\}$, де N – обсяг вибірки в дискретні моменти часу jT_d , де діапазон $j = 1, [T_c/T_d]$, T_d – період дискретизації.

Відношення сигнал/шум (с/ш) визначається як U/σ .

Необхідно запропонувати спосіб виявлення корисних сигналів в суміші (1) за результатами статистичного аналізу їх фазової характеристики та за невідомої частоти сигналу та відношення сигнал/шум близькому до одиниці.

Розв’язання поставленого завдання. Ідея запропонованого варіанту розв’язання сформульованого завдання ґрунтується на відмінності кругової дисперсії V , визначеної за фазовими характеристиками шумової складової, та її суміші з радіоімпульсом, що містить сигнал-носії певної частоти. З практичної точки зору зручніше використовувати іншу, лінійно зв’язану з V статистику – результуючої довжини вектора $r = 1 - V$ [9].

Виявлення корисного сигналу в суміші (1) відбувається за результатами аналізу статистики r , що обчислюється у ковзному режимі для поточних значень різниці дискретної фазової характеристики сигналу (ДФХС) (1) і лінійного тренду фазової характеристики шуму $u_m(t)$. З цією метою виконується дискретне перетворення Гільберта сигналу і визначається його гільберт-образ $\hat{u}[j] = H_d[u[j]]$, де H_d – оператор дискретного перетворення Гільберта [11]. Дробова (тобто в межах напівінтервалу $[0, 2\pi)$) частина дискретної фазової характеристики сигналу (ДФХС) визначається як

$$\varphi[j] = \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign}(\hat{u}[j])(1 + (u[j]))\}, \quad (2)$$

де $\text{sign}(\cdot)$ – знакова функція. Розгорнута (за межі напівінтервалу $[0, 2\pi)$) ДФХС визначається за допомогою оператора L розгортання фазової характеристики сигналу [9]: $\Phi[j] = L(\varphi[j])$.

Попередні дослідження показали, що фазова характеристика реалізації $u_m(t)$; $\Phi_m[j] = L(\varphi_m[j])$, має лінійний тренд $\Phi_m^T[j] \approx 0,985j$ рад, що визначається з середньоквадратичним відхиленням $\sigma_r[j] > 0,004j$ рад. Необхідна для отримання статистики r вибірки фазових даних визначається як різниця ДФХС $\Phi[j]$ і лінійного тренду фазової характеристики шуму

$$\Delta\varphi[j] = \Phi[j] - \Phi_m^T[j], \quad j = \overline{1, N}, \quad N = T_A/T_d. \quad (3)$$

Обчислення статистики r відбувається під час руху прямокутного вікна з апертурою M_w відносно множини (3). На j -тому кроці сканування ковзне вікно забезпечує відбір частини значень $\Delta\varphi[j]$ і визначення поточного значення статистики r у відповідності до виразу

$$r[j, M_w] = \frac{1}{M_w} \times \sqrt{\left(\sum_{k=j-M_w/2}^{j+M_w/2} \cos \Delta\varphi[k] \right)^2 + \left(\sum_{k=j-M_w/2}^{j+M_w/2} \sin \Delta\varphi[k] \right)^2}, \quad j = \frac{M_w}{2}, N - \frac{M_w}{2}. \quad (4)$$

Ознакою наявності корисної складової сигналу є перевищення статистикою $V[j, M_w] = 1 - r[j, M_w]$ певного порогу $\Pi \in (0, 1) \Pi$.

Результати моделювання. На етапі підготовки даних виконувалось:

- формування вибірки аналізованого сигналу $\{u[j], j = \overline{1, N}\}$ з параметрами: $U = 1$ В, $f = 5$ МГц, $T_d = 1,56 \cdot 10^{-9}$ с, відношення сигнал/шум $\eta = 1$, кількість періодів сигналу-носія в одному радіоімпульсі $N_s = 5$, обсяг вибірки $N_\Sigma = 19200$, кількість відліків на період сигналу-носія $N_1 = 128$, період надходження радіоімпульсів $T_\Pi = 6000 T_d = 9,36 \cdot 10^{-6}$ с; сформована вибірка сигналу зображена на рис. 1.

- визначення гільберт-образу сигналу $\hat{u}[j]$;
- обчислення вибірки значень ДФХС $\varphi[j]$ (2) і різниці $\Delta\varphi[j]$ (3) (рис. 2);

- обчислення в ковзному режимі кругової дисперсії $V[j, M_w] = 1 - r[j, M_w]$.

Введення цього коефіцієнта приводить до трансформації діапазону представлення різниць фазових зсувів і, як наслідок, до зменшення розкиду фазових даних в апертурі вікна M_w . Цей коефіцієнт доцільно обирати виходячи з наступних умов:

- діапазон зміни фазових даних в апертурі вікна на ділянках шуму повинен бути значно меншим інтервалу $(0; 2\pi)$;

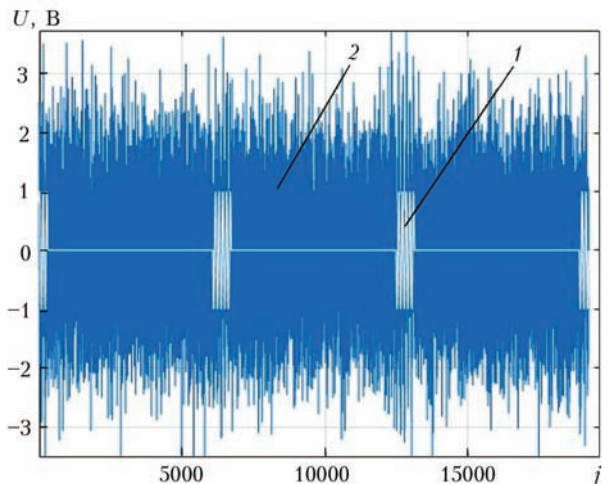


Рис. 1. Реалізація адитивної суміші сигналу (1) та гаусового шуму (2)

– діапазон зміни фазових даних в апертурі вікна на ділянках з радіоімпульсним сигналом повинен покривати інтервал $(0; 2\pi)$;

Як приклад на рис. 3 представлена кругова дисперсія $V[j]$, визначена за змодельованою вибіркою $\Delta\phi[j]$, до використання коефіцієнта K (а) і після застосування коефіцієнта (δ) для значень $K = 50$, $M_W = 50$.

З наведеного графіка видно, що на ділянках без радіоімпульсного сигналу кругова дисперсія $V_{\text{ш}}[j, M_W]$ близька до 0, а на ділянках з сигналом

$V_c[j, M_W] \gg V_{\text{ш}}[j, M_W]$. Ця ознака дозволяє за аналізом кругової дисперсії виявити радіоімпульсні сигнали з гармонічним сигналом-носієм невідомої частоти та оцінити його часове положення.

Виконані дослідження засвідчили, що розмір апертури вікна та коефіцієнт K суттєво впливають на кругову дисперсію $V_c[j, M_W]$ та $V_{\text{ш}}[j, M_W]$ і на можливість виявлення сигналів. Вірогідність виявлення сигналів залежить від різниці значень кругової дисперсії за наявності і відсутності радіоімпульсного сигналу.

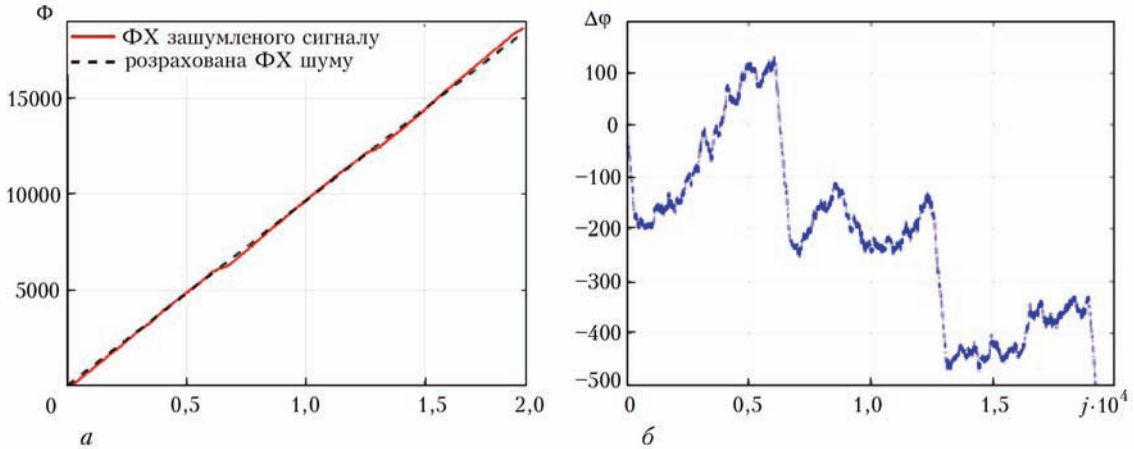


Рис. 2. Графіки характеристик $\Phi[j]$ та $\Phi_{\text{ш}}^1[j]$ (а) та різниця фазових характеристик $\Delta\phi[j]$ (б)

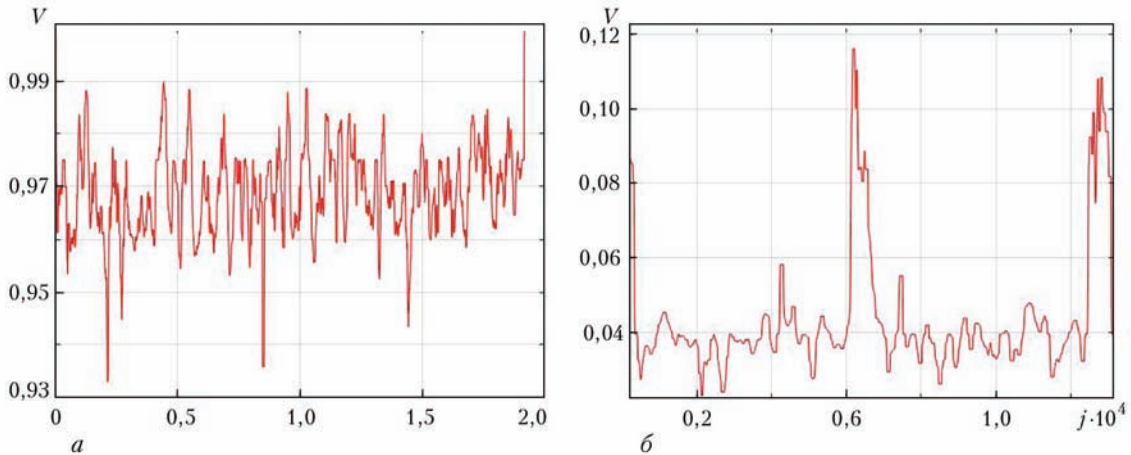


Рис. 3. Графік кругової дисперсії сигналу до (а) і після введення коефіцієнта K (б)

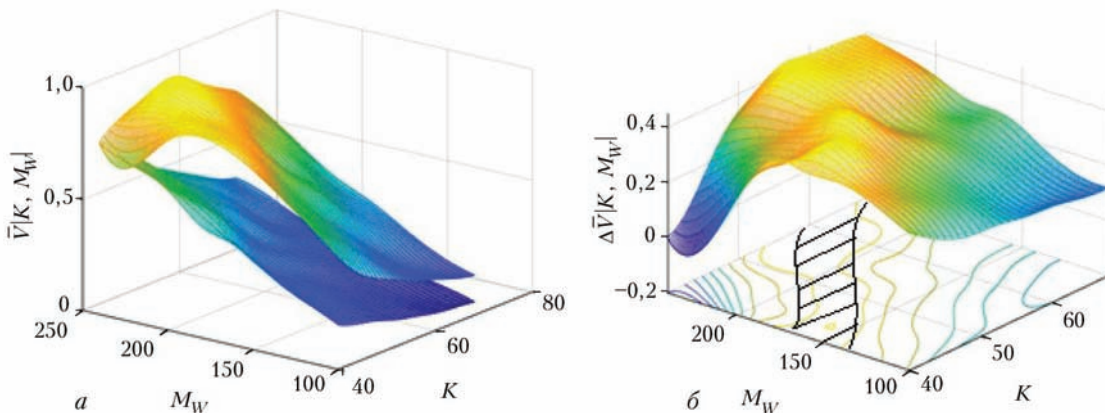


Рис. 4. Залежність середніх значень кругової дисперсії на ділянках без сигналу та з сигналом (а) та різниці середніх рівнів кругової дисперсії (б) від K та M_W

Для визначення впливу K та M_w на кругові дисперсії було виконано додаткові модельні експерименти, які полягали в оцінці функцій: $\bar{V}_c[K, M_w], \bar{V}_{ш}[K, M_w]$ та $\Delta V = \bar{V}_c[K, M_w] - \bar{V}_{ш}[K, M_w]$, де $\bar{V}_{ш}, \bar{V}_c$ – усереднені значення кругової дисперсії на ділянках відповідно з та без сигналу.

Діапазон варіації змінних обрано наступним чином: $K \in (40; 70), M_w \in (100; 250)$. Результат моделювання подано на рис. 4.

З аналізу наведених графіків видно, що значення K та M_w необхідно обирати узгоджено: існує певна область їх значень (на рис. 4, б це заштрихована ділянка на площині M_w, K), для якої досягається збільшення значення $\Delta V[K, M_w]$, що полегшує вибір бракувального рівня та збільшує вірогідність виявлення радіоімпульсних сигналів з апіорно невідомою частотою сигналу-носія.

Висновки

Досліджено можливості розв'язання завдання виявлення і оцінювання часового положення сигналів УНК, які спостерігаються на фоні шуму, через аналіз кругових статистик, що визначені за фазовою характеристикою сигналу в умовах неповної апіорної визначеності моделі сигналу. Реалізація методу, на відміну від відомих, не потребує копії сигналу чи знання її параметрів. Загальна умова висувається лише до форми сигналу: він має існувати як радіоімпульс з певною обвідною та частотою сигналу-носія, що являє собою циклічний сигнал.

Показано, що статистичні відмінності фазових характеристик реалізацій шуму та його суміші з сигналом дозволяють за результатами статистичного аналізу фазових характеристик останніх виявити радіоімпульсні сигнали і оцінити їх часове положення. Метод дещо програє традиційним методам виявлення сигналів на фоні шуму, що пояснюється відсутністю копії сигналу. Проте ця особливість розширює область його застосування на значне коло завдань, для яких існують мінімальні відомості про досліджувані сигнали. Метод дозволяє вирішувати завдання виявлення радіосигналів за відношення сигнал/шум близького до одиниці.

Достовірність отриманих даних підтверджена результатами комп'ютерного моделювання. Розглянутий спосіб виявлення сигналів може бути використаний у доплерівських ультразвукових приладах контролю для технічного і медичного застосування, в інших діагностичних системах, що працюють в динамічних режимах за значної зміни параметрів сигналів.

Список літератури

1. (2014) *Справочник по радиолокации*. Сколник М. И. (ред.). Пер. с англ. под об. ред. Вербы В. С. В 2 книгах. Книга 2. Москва, Техносфера.

2. Маевський С. М., Бабак В. П., Щербак Л. М. (1993) *Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі*. Київ, Либідь.
3. Качанов В. К., Мозговий О. В., Пітолін О. І. та ін. (1994) *Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів*. Навч. посібник. Бабак В. П. (ред.). Київ, ІСДО.
4. Марченко Б. Г., Приймак М. В., Щербак Л. М. (2001) *Теоретичні основи аналізу стохастичних сигналів і шумів*. Навчальний посібник. Тернопіль, ТДТУ імені Івана Пулюя.
5. Качанов В. К., Соколов І. В. (2007) Особенности применения сложномодулированных сигналов в ультразвуковой дефектоскопии. *Дефектоскопия*, **12**, 18–42.
6. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. (2008) Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 31–35.
7. Соколов І. В. (2007) Сплит-способ ультразвукового контроля. *Дефектоскопия*, **12**, 3–17.
8. Тютякин А. В. (2012) О применении вейвлет-преобразования в спектральном анализе информативных сигналов систем неразрушающего контроля и диагностики. *Контроль. Диагностика*, **8**, 11–16.
9. Куц Ю. В., Щербак Л. М. (2009) *Статична фазометрія*. Тернопіль, Вид-во Тернопільського технічного ун-ту імені Івана Пулюя.
10. Близнюк О. Д., Єременко В. С., Куц Ю. В. та ін. (2009) Застосування методу статистичної фазометрії в ультразвуковому неруйнівному контролі. Зб. наук. праць «*Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій*». Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Львів, ФІІ ім. Г. В. Карпенка, 14, сс. 50–55.
11. Лайонс Р. (2007) *Цифровая обработка сигналов*. Второе издание. Пер. с англ. Москва, ООО «Бином-Пресс».

References

1. (2014) *Reference book on radiolocation*. Ed. by M.I. Skolnik. In: 2 books. Book 2. Moscow, Tecnosfera [in Russian].
2. Maevskii, S.M., Babak, V.P., Shcherbak, L.M. (1993) *Fundamentals of construction of signal analysis systems in nondestructive testing*. Kyiv, Lybid [in Ukrainian].
3. Kachanov, V.K., Mozgovyi, O.V., Pitolin, O.I. et al. (1994) *Modern methods and means of ultrasonic testing with application of statistic processing of signals: Manual*. Ed. by V.P. Babak. Kyiv, ISDO [in Ukrainian].
4. Marchenko, B.G., Pryjmak, M.V., Shcherbak, L.M. (2001) *Theoretical fundamentals of analysis of stochastic signals and noises: Manual*. Ternopil, I. Puliya TDTU [in Ukrainian].
5. Kachanov, V.K., Sokolov, I.V. (2007) Features of application of complex modulated signals in ultrasonic flaw detection. *Defektoskopiya*, **12**, 18-42 [in Russian].
6. Karpash, O.M., Rybytsky, I.V., Karpash M.O. (2008) Substantiation of the possibility of Barker code application for improvement of the sensitivity of ultrasonic contactless method for thickness measurement. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol.* **2**, 31-35 [in Ukrainian].
7. Sokolov, I.V. (2007) Split method of ultrasonic testing. *Defektoskopiya*, **12**, 3-17 [in Russian].
8. Tyutyakin, A.V. (2012) On application of wavelet-transformation in spectral analysis of informative signals in the systems of nondestructive testing and diagnostics. *Kontrol. Diagnostika*, **8**, 11-16 [in Russian].
9. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2009) *Static phasometry*. Ternopil, Vyd-vo I. Puliya TDTU [in Ukrainian].
10. Blyznyuk, O.D., Eremenko, V.S., Kuts, Yu.V. et al. (2009) *Application of the method of statistic phasometry in ultrasonic nondestructive testing*. In: *Nondestructive testing of materials and structures: Transact. Series: Physical methods and means of control of media, materials and products*. Lviv, G.V. Karpenka PMI, 14, 50-55 [in Ukrainian].
11. Lyons, R. (2007) *Digital signal processing. 2nd Ed*. Moscow, Binom-Press [in Russian].

Ю. В. КУЦ¹, Ю. Ю. ЛЫСЕНКО¹, М. А. РЕДЬКА¹,
Е. Д. БЛИЗНЮК²

¹НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: j.lysenko@kpi.ua

²Национальный авиационный университет. 03058, г. Киев, просп. Космонавта Комарова, 1

ПРИМЕНЕНИЕ КРУГОВЫХ СТАТИСТИК ДЛЯ
ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА УЛЬТРАЗВУКОВОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Рассмотрен метод обнаружения сигналов ультразвукового неразрушающего контроля на фоне аддитивного гауссового шума. Метод основан на анализе круговой дисперсии, которая определяется фазовой характеристикой исследуемого сигнала, и не требует априорной информации о параметрах модели сигнала ультразвукового неразрушающего контроля. Приведены результаты моделирования процесса обнаружения сигналов ультразвукового неразрушающего контроля на фоне шума. Библиогр. 11, рис. 4.

Ключевые слова: круговые статистики, круговая дисперсия, обнаружение сигналов в шумах, ультразвуковой неразрушающий контроль

APPLICATION OF CIRCULAR STATISTICS FOR
DETECTION OF SIGNALS OF ULTRASONIC
NONDESTRUCTIVE TESTING

Yu.V.KUTS¹, Yu.Yu.LYSENKO¹, M.O.RED'KA¹,
O.D.BLIZNYUK²

¹Igor Sikorskii NTUU «Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremogi Ave., 03056, Kyiv. E-mail: j.lysenko@kpi.ua
²National Aviation University, 1 Kosmonaut Komarov Prop., 03058, Kyiv

The paper deals with the method for detection of signals of ultrasonic nondestructive testing against the background of Gaussian noise. The method is based on analysis of circular dispersion, which is determined by phase characteristic of the studied signal, and does not require a priori information on the parameters of the model of ultrasonic nondestructive testing signal. Results of modeling the process of detection of signals of ultrasonic nondestructive testing against the noise background are given. 11 References, 4 Figures.

Keywords: circular statistics, circular dispersion, signal detection in noise, ultrasonic nondestructive testing

Надійшла до редакції
02.03.2018

ПРЕМИЯ им. АКАДЕМИКА НАН Украины И. К. ПОХОДНИ

Ежегодно, с целью выделения ученых, опубликовавших лучшие научные работы, создавших изобретения и открытия, имеющие важное значение для развития науки и экономики, Национальная академия наук Украины присуждает премии имени выдающихся ученых.

В 2017 г., в частности, был объявлен конкурс на премии имени Н. Н. Боголюбова (отделение математики НАН Украины), Д. В. Волкова (отделение ядерной физики и энергетики НАН Украины), С. М. Гершензона (отделение биохимии, физиологии и молекулярной биологии НАН Украины), И. К. Походни (отделение физико-механических проблем материаловедения) и других известных ученых.

Ученый совет ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины рассмотрел представление и постановил выдвинуть на соискание премии им. академика НАН Украины И. К. Походни за 2017 г. цикл работ под названием «Высокоэффективные сварочные материалы с улучшенными санитарно-гигиеническими показателями для сварки современных высокопрочных низколегированных сталей», выполненный сотрудниками отдела «Исследование физико-химических процессов в сварочной дуге» Института д.т.н. В. В. Головки, к. т. н. И. Р. Явдоциным, д.т.н. В. Н. Шлепаковым. Представление было поддержано отделением физико-технических проблем материаловедения НАН Украины и на заседании президиума НАН Украины от 14.02.2018 г. было принято решение о присуждении этой работе премии имени академика НАН Украины И. К. Походни. Премия была вручена первым вице-президентом НАН Украины академиком А. Г. Наумовцем на общем собрании НАН Украины 26 апреля 2018 г.



В. В. Головки



И. Р. Явдошин



В. Н. Шлепаков

Сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона сердечно поздравляют
В. В. Головки, И. Р. Явдошина и В. Н. Шлепакова
с признанием их заслуг и желают дальнейших творческих успехов.